М. Ю. Пустоветов
ФГБОУ ВО «Ростовский государственный университет путей сообщения»
(г. Ростов-на-Дону, Россия)

ПЕРЕДАТОЧНАЯ ФУНКЦИЯ ВЫХОДНОГО ФИЛЬТРА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ИНВЕРТОРА С УЧЕТОМ АКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ ВЕТВЕЙ И ИНДУКТИВНОСТИ НАГРУЗКИ

Синус-фильтр (СФ) является одним из распространенных вариантов выполнения выходного фильтра электромагнитной совместимости инвертора с широтно-импульсной модуляцией напряжения [1, 2]. СФ выполняет максимальное приближение формы выходного напряжения инвертора к синусоиде, минимизируя значение суммарного коэффициента гармонических составляющих. Задачей фильтров *du*/*dt* является уменьшение скорости изменения импульсного напряжения (сглаживание, заваливание фронтов импульсов) часто до уровня менее 500 В/мкс [3]. При этом форма напряжения на нагрузке остаётся импульсной.

Каждая фаза СФ или фильтр *du*/*dt* представляет собой Г-образный фильтр с индуктивностью L в продольной ветви и емкостью C в поперечной (см. рисунок). Строго говоря, следует учитывать наличие активного сопротивления индуктивного реактора в продольной ветви, включая активное сопротивление r_L последовательно с L. В поперечной ветви последовательно с C в ряде случаев включают демпфирующий резистор r_C. При использовании в частотно-регулируемом электроприводе переменного тока СФ или фильтр *du*/*dt* оказывается нагруженным на активно-индуктивную нагрузку, которую можно представить последовательным соединением $r_{\text{н}}$ и $L_{\text{н}}$.

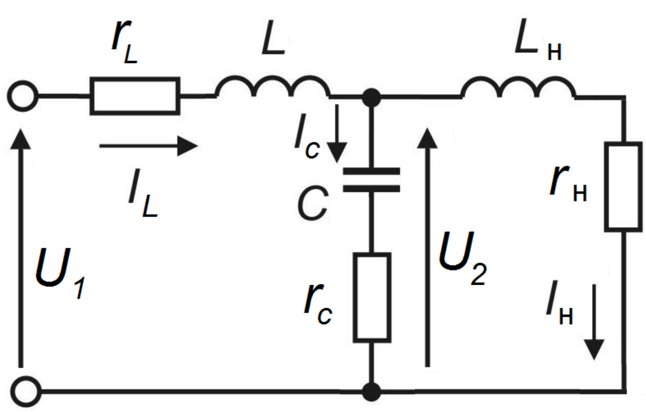

Рисунок. Схема электрическая принципиальная Г-образного фильтра

Для построения систем управления систем управления электротехническими комплексами, содержащих в своем составе СФ или фильтр *du/dt*, требуется знать передаточную функцию (ПФ) последнего. Запишем в операторной форме уравнения электрической цепи, изображенной на рисунке.

$$i_L(p) = i_C(p) + i_{\text{Н}}(p); \quad (1) \qquad u_2(p) = i_C(p)\left(\frac{1}{Cp} + r_C\right); \quad (2)$$

$$u_2(p) = i_{\text{Н}}(p)\left(L_{\text{Н}}p + r_{\text{Н}}\right); \quad (3) \qquad i_L(p) = \frac{u_1(p) - u_2(p)}{Lp + r_L}. \quad (4)$$

Выразим $i_C(p)$ из (2):

$$i_C(p) = \frac{u_2(p)}{\frac{1}{Cp} + r_C}. \quad (5)$$

С учетом (5) выразим из (1) $i_L(p)$, а из (3) выразим $i_{\text{Н}}(p)$:

$$i_L(p) = \frac{u_2(p)}{\frac{1}{Cp} + r_C} + i_{\text{Н}}(p); \quad (6) \qquad i_{\text{Н}}(p) = \frac{u_2(p)}{L_{\text{Н}}p + r_{\text{Н}}}. \quad (7)$$

Подставив (7) в (6), получим

$$i_L(p) = \frac{u_2(p)}{\frac{1}{Cp} + r_C} + \frac{u_2(p)}{L_{\text{Н}}p + r_{\text{Н}}} = u_2(p)\left(\frac{1}{\frac{1}{Cp} + r_C} + \frac{1}{L_{\text{Н}}p + r_{\text{Н}}}\right). \quad (8)$$

Приравняем правые части выражений (8) и (4), сгруппируем множители при входном и выходном напряжениях.

$$u_2(p)\left(\frac{1}{\frac{1}{Cp} + r_C} + \frac{1}{L_{\text{Н}}p + r_{\text{Н}}} + \frac{1}{Lp + r_L}\right) = u_1(p)\frac{1}{Lp + r_L}. \quad (9)$$

Тогда ПФ фильтра по напряжению можно записать в виде

$$W(p) = \frac{u_2(p)}{u_1(p)} = \frac{1}{\left(Lp + r_L\right)\left[\frac{1}{\frac{1}{Cp} + r_C} + \frac{1}{L_{\text{Н}}p + r_{\text{Н}}}\right] + 1}. \quad (10)$$

Если провести проверку, полагая $r_C = r_L = L_{\text{Н}} = 0$ как в [2], то выражение (10) обратится в известное, приведенное в [2] равенство (подобную проверку можно выполнять на любом этапе преобразования ПФ фильтра):

$$W(p)=\frac{1}{p^2LC+\frac{L}{r_{\text{Н}}}p+1}. \qquad (11)$$

Продолжив преобразования выражения (10), получим запись ПФ, в которой параметры ветвей электрической схемы сгруппированы таким образом, что могут быть обозначены как постоянные времени и частота среза:

$$W(p)=\frac{r_C C\frac{L_{\text{Н}}}{r_{\text{Н}}}p^2+\left(\frac{L_{\text{Н}}}{r_{\text{Н}}}+r_C C\right)p+1}{LC\frac{L_{\text{Н}}}{r_{\text{Н}}}p^3+C\left[L\left(1+\frac{r_C}{r_{\text{Н}}}\right)+\frac{L_{\text{Н}}}{r_{\text{Н}}}(r_L+r_C)\right]p^2+\left\{\frac{L}{r_{\text{Н}}}+\frac{L_{\text{Н}}}{r_{\text{Н}}}+C\left[r_L\left(1+\frac{r_C}{r_{\text{Н}}}\right)+r_C\right]\right\}p+\frac{r_L}{r_{\text{Н}}}+1}= \qquad (12)$$

$$=\frac{T_C T_{\text{Н}}p^2+(T_C+T_{\text{Н}})p+1}{\frac{T_{\text{Н}}}{\omega_0^2}p^3+\left[\frac{1}{\omega_0^2}\left(1+\frac{r_C}{r_{\text{Н}}}\right)+T_{\text{Н}}(T_C+r_L C)\right]p^2+\left\{\frac{L}{r_{\text{Н}}}+T_{\text{Н}}+r_L C+T_C\left(\frac{r_L}{r_{\text{Н}}}+1\right)\right\}p+\left(\frac{r_L}{r_{\text{Н}}}+1\right)}.$$

Если принять $r_C=r_L=0$, а $L_{\text{Н}}\neq 0$, то выражение (12) можно преобразовать в этом частном случае к виду

$$W(p)=\frac{\frac{L_{\text{Н}}}{r_{\text{Н}}}p+1}{LC\frac{L_{\text{Н}}}{r_{\text{Н}}}p^3+CLp^2+\frac{L+L_{\text{Н}}}{r_{\text{Н}}}p+1}=\frac{T_{\text{Н}}p+1}{\frac{T_{\text{Н}}}{\omega_0^2}p^3+\frac{p^2}{\omega_0^2}+\left(\frac{L}{r_{\text{Н}}}+T_{\text{Н}}\right)p+1}. \qquad (13)$$

В ряде случаев можно пренебречь величиной r_L при $r_C\neq 0$ и $L_{\text{Н}}\neq 0$, тогда выражение (12) примет вид

$$W(p)=\frac{T_C T_{\text{Н}}p^2+(T_C+T_{\text{Н}})p+1}{\frac{T_{\text{Н}}}{\omega_0^2}p^3+\left(\frac{1}{\omega_0^2}+\frac{L}{r_{\text{Н}}}T_C+T_C T_{\text{Н}}\right)p^2+\left(\frac{L}{r_{\text{Н}}}+T_C+T_{\text{Н}}\right)p+1}. \qquad (14)$$

Список использованных источников

1. Пустоветов, М.Ю. О синус-фильтре для частотно-регулируемого асинхронного электропривода/ М.Ю. Пустоветов // Сб. докл. 4-й Междунар. науч.-практ. конф. «Эффективное и качественное снабжение и использование электроэнергии» ЭКСИЭ - 04 (26-28 мая 2015 г.) – Екатеринбург : Издательство УМЦ УПИ, 2015. – С. 222 – 224.

2. Захаров, А. Расчет выходного фильтра ШИМ-инвертора / А. Захаров // Современная электроника, 2005. - №6 – С. 48 – 50.

3. Пустоветов, М.Ю. Расчет и моделирование фильтров *du/dt* для частотно-регулируемого электропривода на примере асинхронного вспомогательного привода электровоза / М.Ю. Пустоветов // Электроника и электрооборудование транспорта, 2015. - №2 – С. 27 – 31.